

Blick in die Zukunft der Eisenbahn – Grundlagen des digitalen Bahnsystems

*Ingo Biembacher, Annika Hundertmark, Patrick Marsch, Achim Fiack,
Andy Grell, Dirk Spiegel, Moritz Heimes und Thomas Laux*

1 Vision und Ziele

Die Eisenbahn spielt eine zentrale Rolle für die Entwicklung eines umweltfreundlicheren Verkehrs und hilft Deutschland und Europa, die Herausforderungen einer nachhaltigen Mobilität zu meistern. Die Schiene ist nach wie vor eine der besten Lösungen zur Umsetzung der umweltfreundlichen Verkehrswende. Um das volle Potenzial des Bahnsystems sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr zu nutzen und noch mehr Verkehre auf die Schiene zu verlagern, ist die Digitalisierung des Bahnsystems ein wichtiger „Game Changer“.

Auftrag der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD) ist es, die Eisenbahn für das 21. Jahrhundert aufzustellen und die Chancen der Digitalisierung konsequent zu nutzen, um die Leistungsfähigkeit des Bahnsystems signifikant zu steigern – ohne den Neubau von Gleisen.

Das Fundament dafür wird mit der grundlegenden Modernisierung der Infrastruktur durch die flächendeckende Einführung digitaler Leit- und Sicherungstechnik (DLST) gelegt. Der erste Beitrag dieser Reihe, erschienen im EIK 2022 [1], fokussierte auf diese erste Stufe der Digitalisierung: der Einführung des europäischen Zugbeeinflussungssystems „European Train Control System“ in der Ausprägung „Level 2 ohne Signale“ (ETCS L2oS) und digitaler Stellwerke (DSTW), und die damit verbundenen Auswirkungen auf Kapazität und Betriebsqualität im Schienenverkehr.

Darüber hinaus arbeitet die DSD an einer weitergehenden Digitalisierung des Bahnsystems. So sollen Künstliche Intelligenz (KI) und automatisiertes Fahren im optimalen Abstand zukünftig zur neuen Normalität auf dem Gleis werden. Dadurch entfaltet das digitale Bahnsystem erst sein volles Potenzial: Züge, die voll automatisiert und in kürzeren Abständen fahren, die in Echtzeit intelligent und automatisiert gesteuert werden, die ihre Umwelt und ihre Position durch Sensorik erkennen und auf Störungen selbstständig reagieren – das ist das Zielbild der Sektorinitiative DSD für das Gesamtsystem Bahn.

Das Ziel ist demnach die durchgreifende Digitalisierung des gesamten Schienennetzes und des Fahrbetriebes. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen zahlreiche, größtenteils noch nie im Bahnsystem verwendete Technologien eingeführt werden. Diese zweite Stufe bedeutet mithin für das nun in fast zwei Jahrhunderten gewachsene Eisenbahnsystem mit seinen zahlreichen Vorschriften und Regelwerken umfassende Änderungen. Die meisten Prozesse und Rollen im künftigen digitalen Bahnsystem werden sich grundlegend von den heutigen unterscheiden. Um zu verstehen, welche Änderungen die Digitalisierung mit sich bringt, müssen daher zunächst die allgemeinen Grundlagen des digitalen Bahnsystems sowie die Unterschiede zum heutigen System beschrieben werden. Dies steht im Fokus des folgenden Beitrages.

2 Situation des heutigen Eisenbahnsystems

Eisenbahnsysteme gehören zu den Wegbereitern der Mobilität von Gütern und Menschen und damit von Industrialisierung und Wohlstand. Ihre Entwicklung nahm ihren Anfang in privaten Initiativen und führte mit schnellen Schritten zu einer Vielzahl von Kapitalgesellschaften, die den Bau und Betrieb von Strecken und Fahrzeugen vorantrieben. Erste technische und betriebliche Standardisierung resultierte überwiegend aus solchen Pionierleistungen im Verbund mit kommerziellen Erwägungen. Die zunehmende strategische Bedeutung führte dazu, dass Nationalstaaten die Förderung und Regelung übernahmen, bzw. aus Privatbahnen Staatsbahnen wurden und sich nationale Eisenbahnnetze und schließlich ein europäisches Eisenbahnnetz entwickelte. Aufgrund dieser Entwicklung haben sich einige Standards europaweit ausgeprägt, andere sind jedoch nationaler Standard geblieben.

Kernvorteil des Bahnsystems gegenüber anderen Verkehrsträgern war und ist die Fähigkeit, hohe Lasten mit geringem spezifischem Energieaufwand, in großer Zahl und mit hohem Sicherheitsniveau transportieren zu können. Dabei gab es viele Technologiesprünge (Elektrifizierung, Elektronische Stellwerke – ESTW, Hochgeschwindigkeitsverkehr (z. B. ICE, TGV), elektronische Brems-/Antriebstechnik mit Energierückgewinnung, kontinuierliche Zugsicherung (LZB/ETCS) und aktuell Digitale Stellwerke (DSTW) etc.), die das Eisenbahnsystem immer leistungsfähiger, sicherer und effizienter machten. In Verbindung mit nationaler Regulierung entwickelten sich daraus meist auch nationale technologische und betriebliche Lösungen, die dann durch die Regulierungsansätze der Europäischen Union wieder unter Druck gerieten. Um die Fragmentierung des europäischen Eisenbahnraumes zu überwinden, hat die Europäische Union in den letzten Jahrzehnten diverse Regulierungsansätze initiiert, die auf eine sogenannte „Single European Railway Area“ (SERA) abzielen.

Einhergehend damit nahm die europäische Regulierung auch Einfluss auf die rechtliche Trennung von Infrastrukturbetreibern und Verkehrsunternehmen („Unbundling“), um damit den Wettbewerb im Bahnbereich zu fördern.

Auch die Globalisierung setzt das Bahnsystem unter Druck, diesmal sowohl auf der Seite der Hersteller und Lieferanten, da die europäische Vielfalt von betrieblichen und technischen Standards und von dafür individuell entwickelten Produkten im weltweiten Wettbewerb einen Nachteil darstellt. Aber natürlich auch auf der Seite der Betreiber (und Nutzer), die letztendlich diese Entwicklungskosten tragen müssen.

Im Rahmen der Digitalisierung treten verstärkt andere oder neue Verkehrssysteme in Konkurrenz, sei es durch effiziente Plattformlösungen (z.B. Sharing-Konzepte) oder durch technologische Entwicklung (z.B. autonome Fahrzeuge, Drohnen, neue Antriebstechniken).

Die gegenwärtige Diskussion um die erforderliche Dekarbonisierung ganzer Wirtschaftsbereiche verschafft dem Bahnsystem aufgrund seiner eingangs genannten Vorteile Rückenwind für eine Modernisierung. Zeit dafür, das Bahnsystem weiter zukunftsfähig zu machen und nicht als „Follower“, sondern wieder als „Pioneer“ und somit Vorreiter zu denken. Um die oben genannten verkehrs-, wirtschafts- und umweltpolitischen Visionen und Ziele aus nationaler und europäischer Perspektive in angemessener Umsetzungszeit bedienen zu können, kann dies nicht nur klassisch durch den Bau von zusätzlicher Infrastruktur erreicht werden, sondern es müssen Wege gefunden werden, durch Modernisierung und Digitalisierung die Leistungsfähigkeit im bestehenden Bahnsystem zu steigern. Die Lösungsansätze dafür liefern zum einen Impulse von außen, zum anderen die Analyse von Handlungsfeldern im heutigen Bahnsystem (Abb. 1).



Abb. 1: Anspruch und wesentliche Hebel für eine Modernisierung des Eisenbahnsystems

3 Generelle Modernisierungsimpulse

3.1 Digitalisierung und Automatisierung

Die in allen Industriesektoren allgegenwärtige Digitalisierung mit ihrer Abkehr von Hardware- hin zu Softwareorientierung und die Entkopplung von Applikationen/Software von der Hardwareplattform bieten die Möglichkeit, viele hardwarelastige, technische Lösungen im heutigen Bahnsystem zu modernisieren oder gar Hardware durch Software zu „virtualisieren“. Darüber hinaus sollte auch die Skalierbarkeit von technischen Plattformlösungen viel stärkeren Eingang in die Entwicklung des Bahnsystems finden.

Die gesteigerte Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit von Sensorik, Rechenleistung (Computation), Konnektivität (Breitband bzw. Latenzreduktion) und KI sind Treiber von Automatisierungstendenzen in allen Wirtschaftsbereichen. Insbesondere die Entwicklung hin zum autonomen Fahren im Individualverkehr auf der Straße legt nahe, auch im Bahnsystem entsprechende Entwicklungen zu treiben. Dabei kann davon profitiert werden, dass viele Technologien aus anderen Sektoren, wie bspw. Automotive, übernommen werden können, deren Märkte deutlich größer sind und in denen Forschung und Entwicklung auf breiterer Front stattfindet als im vergleichsweise kleinen Bahnsektor.

3.2 Modularisierung und Standardisierung

Das Bahnsystem ist ein über Dekaden gewachsenes System, bei dem in der Regel schrittweise Technologieerweiterungen stattfanden. Aufgrund einer fehlenden Modularität und insbesondere fehlender sektorübergreifender Standards sind die nationalen Bahnsysteme meist sehr proprietär und nur mit hohem Aufwand (finanziell sowie zeitlich) für Engineering, Nachweisführung und Zulassung weiterentwickelt und adaptierbar. Dies betrifft sowohl die betrieblich-funktionale Ebene von Verfahren und Prozessen wie auch die Implementierung technischer Systeme. Aufgrund einer eher gewachsenen Architektur sind die nicht-funktionalen Anforderungen, z. B. für Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, nicht integriert für das Gesamtsystem definiert, sondern nur unabhängig für einzelne Teilsysteme. Hier ist es erforderlich, konkrete nicht-funktionale Anforderungen systematisch und technologieunabhängig auf Gesamtsystemebene festzulegen und auf die Teilsysteme zu verteilen. Denn gerade für hochautomatisierte Systeme ist eine ausreichende Robustheit essenziell.

Ein systematisches und technologieunabhängiges Vorgehen im Verbund mit klaren Modularisierungs- und Standardisierungszielen sowie modell- bzw. simulationsbasierten Nachweisverfahren macht die Anpassungsfähigkeit des Bahnsystems für den Einsatz neuer Technologien und auch die Beherrschung immer kürzerer Technologielebenszyklen des Chipzeitalters erreichbar.

4 Funktionale Handlungsfelder zur Modernisierung des Bahnsystems

4.1 Handlungsfeld Verkehrssteuerung und Informationsaustausch

Die Gesamtheit der Verkehrssteuerung im heutigen Bahnsystem zerfällt in mehrere Rollen. Das Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU mit „Verkehrsleitung“) deckt dabei die Steuerung seiner Fahrzeugbewegungen ab. Das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU mit „Netzfahrplan“, „Betriebszentrale“ und „Fahrdienstleitung“) wiederum deckt für seine Infrastruktur die Steuerung der Trassenzuweisung, Energieversorgung und Verkehrsstationen ab.

Die Komplexität dieses aktuell überwiegend von Menschen ausgeübten Steuerungsprozesses wird dadurch beherrscht, dass er in kleinere Teilbereiche zerlegt und der reguläre Informationsaustausch reduziert wird. In der Folge haben sich spezifische Informationsperspektiven ausgeprägt: Jeder weiß nur das, was er unmittelbar braucht.

Die Gesamtinformation ist dabei nur theoretisch als Summe einzelner Informationsperspektiven verfügbar: Das EIU weiß nur wenig über den Zustand und Besetzungsgrad von Fahrzeugen oder deren Energiebedarf. Das EVU weiß nur wenig über den Zustand und den exakten Verlauf des Fahrwegs sowie über den Besetzungsgrad von Bahnsteigen. Die Informationshaltung ist ausgerichtet auf den minimalen Informationsbedarf der einzelnen Perspektiven. Die dafür verwendeten Systeme benutzen unterschiedliche Informationslogiken, haben nur wenige standardisierte Schnittstellen und tauschen ihre Informationen daher in geringem Umfang aus. Insgesamt sind Robustheit und Reaktionsschnelligkeit und eine gesamthafte Optimierung dadurch limitiert.

Auch beim Umgang mit bau- und instandhaltungsbedingten Einschränkungen der Infrastrukturverfügbarkeit in der Verkehrssteuerung wird heute zur Komplexitätsreduktion stark kompartimentalisiert, damit der Prozess von Menschen geplant und gehandhabt werden kann.

Im Falle von Abweichungen im Betriebsablauf sind die Akteure häufig damit beschäftigt, weitere, dann benötigte Informationen zu beschaffen, um Entscheidungen zu treffen, die dann auch wiederum untereinander ausgetauscht oder sogar erst gemeinsam getroffen werden können. Und spätestens jetzt findet die Komplexitätsreduktion ihre Grenzen (Abb. 2).

Dies alles stellt gegenwärtig ein großes Hemmnis für Echtzeitverkehrssteuerung und die Nutzung dafür benötigter Algorithmik und Automatismen dar. Gleichzeitig limitiert dies auch die Realisierbarkeit von Potenzialen einer exakt synchronisierten Fahrwegeinstellung und Fahrzeugbewegung.

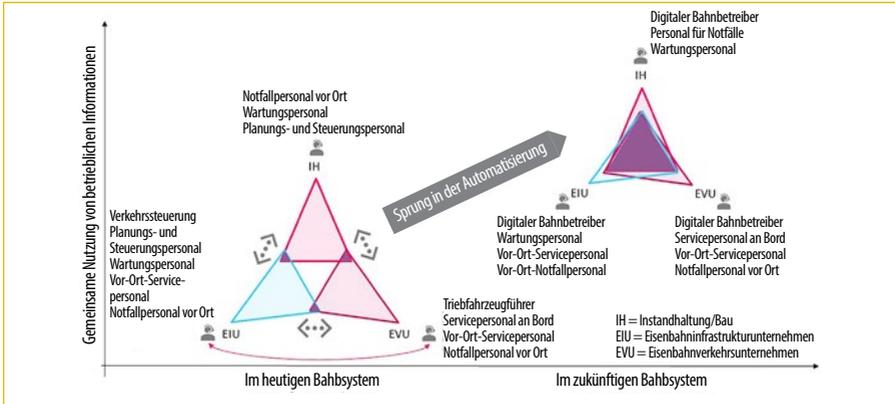


Abb. 2: Die unter den handelnden Akteuren geteilten „Betriebsinformationen“ (violett) steigen durch Digitalisierung und Automatisierung. Die „Systemtransparenz“ wird dadurch für alle deutlich größer.

Durch Verfahren und Systeme für durchgängige, automatisierte und auf Zustandsinformationen basierende Echtzeitsteuerung für Trassen, Fahrzeuge und Bahnsteige ist eine signifikante Steigerung von Leistungsfähigkeit und Qualität im Verbund mit Effizienzsteigerungen zu erwarten.

4.2 Handlungsfeld Fahrweg- / Zugsicherung

Die heute verwendeten Verfahren und Systeme der Fahrweg- und Zugsicherung beruhen wesentlich auf einer Abschnittslogik mit ortsfester Signalisierung und diskreter Überwachung von Bewegungen. Eine Abschnittslogik bedeutet, dass die Gleisinfrastruktur in statische Abschnitte unterteilt ist, in die jeweils nur ein Zug auf einmal einfahren darf, und an deren Grenzen sich teure und wartungsintensive Achszähler befinden, die registrieren, wann ein Zug in einen Abschnitt ein- oder ausfährt. Diese bzw. ihre Weiterentwicklung wurde bestimmt von technischen Limitierungen ihrer Zeit – verbunden mit aufwendiger Realisierung (Infrastrukturausrüstung und individuelle Projektierung). Im umfangreichen technischen und betrieblichen Regelwerk mit hohen Anforderungen an die Anwender manifestiert sich die Komplexität.

Zur Überwindung der nationalen Lösungen wurde das European Train Control System (ETCS) entwickelt. Allerdings wird es bislang mit stark nationaler Prägung umgesetzt, sodass verschiedene, miteinander nicht kompatible ETCS-Implementierungen entstanden. Die gegenwärtig mit ETCS erreichten Möglichkeiten wie kontinuierliche Überwachung und Verzicht auf ortsfeste Signalisierung sind ein wichtiger Meilenstein, lassen sich aber noch weiter ausbauen. Denn was heutige Verfahren und Sys-

teme nicht ermöglichen, ist die weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit der Fahrwegsteuerung ohne gleichzeitig negative Einflüsse auf die Effizienz. So lassen sich abschnittsbasierte Logiken zwar beliebig verfeinern, dies allerdings nur mit Anstieg von Außen- und Innenanlagen (Balisen, Achszähler) und deren Projektierungsaufwand. Durch Virtualisierung kann dem zwar entgegengewirkt werden, jedoch nur für die physischen Außenanlagen, die Zunahme der Innenanlagen bleibt bestehen. Außerdem sind heutige Verfahren und Systeme auch im Bereich Fahrweg- / Zugsicherung immer noch in hohem Maße auf die Bedienung durch den Menschen ausgerichtet.

Insbesondere der erforderliche individuelle Projektierungsaufwand hemmt die Flexibilität bei Änderungen der Infrastrukturtopologie und verursacht lange Projektlaufzeiten bis zur effektiven Nutzbarkeit oder beeinflusst Kosten-Nutzen-Betrachtungen negativ zulasten der Flexibilität (z.B. Gleiswechselbetrieb, Bahnhofsein- / -ausfahrtvarianten). Mit einer neuen Herangehensweise mit generischer Sicherungslogik, die nicht mehr allein auf streckenseitiger Gleisfreimeldung und Fahrstraßen beruht, sondern auf dynamischer Abstandsregelung zwischen Bewegungsvektoren und Gefahrenpunkten („Zugzentrik“), können die Potenziale von ETCS vollständig ausgeschöpft werden. Außerdem entfällt der projektbezogene Projektierungs- und Nachweisaufwand, da die Topologie in einer sicheren digitalen Karte erfasst wird.

Dadurch ist ein modernes Sicherungssystem nicht einfach die Kombination von heutigem Stellwerk und Radio Block Centre (RBC), sondern der Paradigmenwechsel von abschnitts- zu zugzentrischer Sicherungslogik ist das Schlüsselement: Erstmals wird das zentrale Objekt „Zug“ in den Mittelpunkt gestellt, statt indirekt über das Hilfsobjekt „Belegung“ Schlussfolgerung über Züge abzuleiten. Zwar bringt ein RBC Zuginformationen ein, jedoch sind auch bei kombinierten Stellwerks- und RBC-Systemen die Rollen klassisch verteilt, und die gemeinsame Informationsbasis ist gering ausgeprägt. Die Ableitung von Zug- aus Belegungsinformation bzw. die sichere Zuordnung von Zugpositionen zu Belegungen (Fahrstraßen, Signalen) ist aufwendig und kann betrieblich einschränkend wirken. Ein modernes Sicherungssystem kann daher eine wesentliche Vereinfachung des Sicherungskerns bewirken, seine Stabilität erhöhen und betrieblich aufwerten.

Die Zugzentrik des Sicherungssystems erlaubt auch eine flexiblere Ansteuerung durch Verkehrssteuerungssysteme: Die Anforderung einer sicheren Fahrt von A nach B ist mit diskreten B (wie Abschnittsgrenzen) genauso möglich wie das oftmalige Verlängern von B (Fahren im wandernden Raumabstand – Moving Block). Der Sicherungskern ist in beiden Fällen vollständig gleich, und es ist für ihn transparent, nach welchem Prinzip er angefragt wird. Über flexibles Anfragen bzw. Erteilen von Fahrterlaubnissen kann großes Potenzial gehoben werden.

Was also benötigt wird, sind grundlegend neue Ansätze der Zugsicherung und Systeme, die zum einen die Abkehr von abschnittsbasierten hin zu zugzentrischen Logiken ermöglichen, bei denen Züge in dichter Folge fahren können. Zum anderen ermöglichen sie, dass digital beschriebene Infrastrukturtopologien ohne individuelle Projektierungen sicher und prozessual einfacher betrieben und flexibel geändert werden können. [2 und 3]

4.3 Handlungsfeld Fahrzeugbewegung

Dafür, dass Züge sich bewegen, gibt es im klassischen Bahnsystem zwei wesentliche Rollen: Die des Triebfahrzeugführers (Tf) im Führerstand und die des Fahrdienstleiters (Fdl) an der ortsfesten Bedieneinrichtung (Stellwerk). Dabei kann man sogar argumentieren, dass die Umsetzung der Fahrterlaubnis (Signal) in eine Fahrzeugbewegung eigentlich auch komplett durch die EIU-Rolle abgedeckt wäre, jedoch aufgrund technischer Einschränkungen (keine direkte Wirkmöglichkeit auf die Zugsteuerung) an die EVU-Rolle delegiert ist.

Im Normalbetrieb findet die Interaktion sehr reduziert statt. Allerdings werden schon im Normalbetrieb die Leistungsfähigkeit und Qualität stark von menschlichen Fähigkeiten beeinflusst. Wahrnehmungs-, Entscheidungs-, und Bedienzeiten können den Betriebsablauf hemmen. Individualität, Irrtümer und Fehler der Bediener, auch verbunden mit tageszeitlich oder witterungsbedingt wechselnden Sichtverhältnissen sind weitere Einflüsse, die in einem Hochleistungssystem entscheidende Limitierungen sein können. Dies führt dazu, dass das Potenzial exakt aufeinander synchronisierten Zusammenwirkens von Infrastruktur- und Fahrzeugbedienung gegenwärtig nur selten erreicht werden kann.

Aufgrund der Fahrzeuglänge und der erforderlichen Ausdehnung von Abstellanlagen sind auch die Wegezeiten der Fahrzeugbediener zu Fahrtbeginn/-ende und bei Fahrtrichtungswechseln erheblich. Dazu kommt, dass durch die Bedienung aus dem Führerstand weitere Zwangspunkte für den Personalwechsel entstehen.

Im Störfall sind Fdl und Tf auf direkte Interaktion angewiesen, können aber häufig auch nicht ohne Einbindung weiterer Unterstützung (z. B. von Disponenten, Instandhaltern/Entstörern, Notfallmanagern) agieren. Hiermit schließt sich auch der Kreis zum Thema Informationsaustausch und Verkehrsmanagement.

Gerade das Bahnsystem bietet im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern gute Voraussetzungen für eine weitgehende Automatisierung von Fahrzeugbewegungen:

- die Spurbundenheit mit sicherer Fahrwegeinstellung und dadurch begrenzter Verantwortung des Tf
- die potenzielle Kreuzungsfreiheit mit dem straßengebundenen Verkehr

- die Netzbetriebsführung, bei der im Prinzip alle Fahrzeugbewegungen, Überholungen und Fahrwegeinstellungen konfliktfrei geplant sind
- der schon erreichte Automatisierungsgrad der Fahr- und Bremssteuerungen von Fahrzeugen
- die mit ETCS erreichte Führerstandssignalisierung und kontinuierliche Überwachung von Bewegungen
- die im Vergleich zum Straßenverkehr geringere Anzahl von Akteuren (“Verkehrsteilnehmern”).

Was es braucht, sind neue Systeme und Verfahren, mit denen Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Bedienfähigkeiten automatisiert werden, die heute noch Menschen auferlegt sind. Ziel muss es sein, dabei auch das Thema Ereignismanagement von Anfang an mitzuberücksichtigen. Insbesondere die automatisierte Erfassung und Bewertung von Ereignissen bietet die Chance, schneller, frühzeitiger und vollständiger auf Ereignisse zu reagieren und so ggf. die Auswirkungen zu begrenzen. Allerdings bleiben die eigentliche Störungsbeseitigung und ggf. das Notfallmanagement Disziplinen, die immer menschliches Handeln erfordern werden. Im Zusammenwirken von Automatisierung und besseren Prozessen liegt auch hier großes Potenzial gegenüber heute.

Damit wird es möglich, den Automatisierungsgrad (Grade of Automation, GoA) von hochautomatischem Fahren (GoA 2) über fahrerloses Fahren (GoA 3) bis hin zu unbegleitetem, d.h. vollautomatischem Fahren (GoA 4) überall dort zu erhöhen, wo es erforderlich ist, um eine signifikante Steigerung von Leistungsfähigkeit und Qualität im Verbund mit Effizienzsteigerungen zu erreichen.

4.4 Handlungsfeld Topologie- und Topografiedaten

Es gibt gegenwärtig keine Verfahren und Systeme, mit denen die effiziente Verfügbarkeit sicherer Topologiedaten (Knoten- und Kantenmodell) gewährleistet werden kann. Diese sind aber nicht nur für die Projektierung der leistungsbestimmenden Fahrweg- und Zugsicherung erforderlich, sondern auch als Grundlage der Fahrplankonstruktion. Gleiches gilt auch für Topografiedaten (3D-Stützpunkte für Interpolation), die immer dann relevant werden, wenn nicht nur Informationen zum reinen Strecken-/Gleisverlauf, sondern zum Umfeld (Lichtraum, Randweg, Kabelführung, Vegetation, angrenzende Flurstücke etc.), Zuwegungen (Instandhaltung, Evakuierung etc.) sowie Bahnsteigen/Stationsbereichen benötigt werden.

Geeignete Verfahren und Systeme, die sowohl Topologie- als auch Topografiedaten effizient und sicher verfügbar machen, werden eine elementare Grundlage für die Modernisierung des Bahnsystems.

4.5 Handlungsfeld Telekommunikation und IT-Plattformen

Eine wesentliche Voraussetzung für ein zukunftsfähiges und insbesondere kosteneffizientes Bahnsystem sind leistungsfähige und modulare Konnektivitäts- und IT-Plattformen. Im heutigen Bahnsystem besteht das Problem, dass bahnbetriebliche Applikationen und die darunterliegenden Plattformen stark verflochten sind. Ein Beispiel hierfür sind die sogenannten „Euroradio“-Funktionen des heutigen Bahnfunks GSM-R, bei denen Teile der Applikation und der Kommunikationstechnologie integriert sind. Zudem bestehen bahnbetriebliche Applikationen heutzutage aus einem monolithischen Block aus Applikation, Middleware und Hardware aus der Hand eines Herstellers. Dies hat zur Folge, dass eine Evolution der Kommunikations- oder der IT-Plattformtechnologien stets eine Neuzulassung der Applikation erfordert. Zudem ist der Marktwettbewerb eingeschränkt, und der Bahnsektor ist auf bahnspezifische Lösungen angewiesen.

Ein wesentlicher Schritt für den Bahnsektor ist es folglich, eine standardisierte Trennung von bahnbetrieblichen Applikationen, Konnektivitätsfunktionen und IT-Plattformen einzuführen, wie es im Luftfahrt- und Automobil-Sektor bereits erfolgt ist. Hierdurch können die sehr unterschiedlichen Lebenszyklen der Domänen berücksichtigt werden,



Daten als Service



*Unsere innovative Cloud-Anwendung
nun auch als mobile und native App.*



diese können weitestgehend unabhängig voneinander migriert werden, es entsteht ein breiterer Markt an Applikations- und Plattform-Herstellern, und es können neueste Trends sowie etablierte und kostengünstigere „Mainstream“-Lösungen aus anderen Sektoren für den Bahnsektor genutzt werden. Durch eine Nutzung gemeinsamer IT-Plattformen durch mehrere Anwendungen und eine vereinheitlichte Administration sowie vereinheitlichte Diagnosefunktionen können zudem Investitions-, aber auch Betriebskosten deutlich gesenkt werden. Voraussetzung für alle zuvor genannten Vorteile sind modulare Zulassungsprozesse, die es ermöglichen, dass einzelne Applikationen oder Plattformtechnologien migriert werden können, ohne dass die jeweils anderen Hersteller in den (Wieder-)Zulassungsprozess involviert sein müssen. Konkrete von der DSD vorangetriebene Plattformtechnologien sind in Abschnitt 5.2.3 beschrieben.

Auch in der Entwicklung des zukünftigen Bahnsystems spielen moderne IT-Plattformen eine essenzielle Rolle. So ermöglichen es z. B. moderne DevSecOps-Ansätze und entsprechende IT-Werkzeuge, dass bereits bei der Softwareentwicklung von Funktionen des Bahnsystems inhärent erforderliche Normen eingehalten werden und die spätere Zulassung vereinfacht wird. Ferner erfordert das Antrainieren der KI, die das automatisierte Bahnsystem beinhalten wird, leistungsfähige IT-Plattformen mit einem Speichervermögen von mehreren PetaByte.

4.6 Zusammenwirken der Handlungsfelder

Es ist ersichtlich, dass in einer integrierten Modernisierung durch das Zusammenwirken der Bereiche

- Verkehrssteuerung und Informationsmanagement,
- Fahrweg-/Zugsicherung,
- Fahrzeugbewegung,
- Topologie- und Topografiedaten,
- Telekommunikation und IT-Plattformen

das größte Potenzial liegt.

Schlanke und leistungsfähige Fahrweg-/Zugsicherung für digitale Infrastrukturlayouts im Verbund mit hocheffizienten vollautomatisierten Fahrzeugen, exakt synchronisiert durch eine Echtzeitverkehrssteuerung auf Basis von Zustandsinformationen, bringen Bahnsysteme im Vergleich der Verkehrssysteme wieder an die Spitze.

5 Weg zur Realisierung

5.1 Allgemeines Vorgehen

Die Modernisierung des Bahnsystems kann nur gelingen, wenn Politik, Aufgabenträger, Eigentümer, Betreiber und Hersteller gemeinsam den Grundstein dafür legen.

Dies gilt insbesondere, weil auf dem Weg neben der reinen Bewältigung betrieblicher und technischer Herausforderungen natürlich auch Finanzierungssicherheit und Anpassung von Rechtsnormen das Vorhaben ermöglichen müssen. Aus nationaler Perspektive bietet die Sektorinitiative DSD dafür die Basis, im Zusammenspiel mit europäischen Initiativen.

Um dies zu erreichen, kommt es insbesondere darauf an, mit einem systematischen Ansatz zunächst auf betrieblicher Ebene die Zusammenhänge des komplexen Bahnsystems zu erfassen und zu analysieren. Risiken für Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (Safety und Security) müssen analysiert und mit Maßnahmen hinterlegt werden, die für die Erreichung der jeweiligen Ziele des Gesamtsystems erforderlich werden. Die Beherrschung betrieblicher und systemischer Risiken dient anschließend als Grundlage für Entwurfsentscheidungen. Eine solch weitgehende Abstrahierung der betrieblichen und wirtschaftlichen Anforderungen von der technischen Lösung schafft Unabhängigkeit und Offenheit für den Technologieeinsatz.

Damit wird es möglich, gezielt eine übergreifende Systemarchitektur des digitalen Bahnsystems zu entwickeln, die für eine nutzenorientierte Technologieentwicklung und -implementierung dienlich ist. Außerdem wird damit eine Grundlage geschaffen, die in der Entwicklung sicherheitskritischer Systeme rechtlich geforderten Nachweise effizienter führen zu können, als das bislang der Fall ist.

Da ein solches systematisches Vorgehen mit rein textueller Methode nicht beherrschbar ist, wurde ein Vorgehen nach den Methoden des modellbasierten Systems-Enginee-

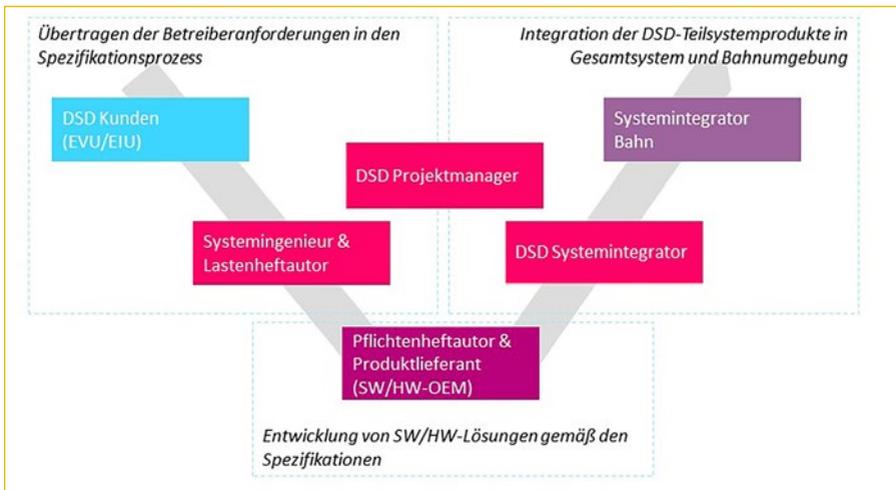


Abb. 3: Schematische Rollenverteilung für die Systementwicklung

rings (MBSE) gewählt. Neben der Eindeutigkeit, Klarheit, Konsistenz und Effizienz, die dadurch im Zusammenspiel der Systemingenieure erreicht werden kann, ist auch die Möglichkeit zur Simulation des entstehenden Systemmodells ein großer Vorteil. Mit der Simulation lässt sich zum einen die Qualität des Systementwurfs bereits vor der Realisierung überprüfen und verbessern, zum anderen bietet sie auch eine Grundlage für die Automatisierung erforderlicher Validierungs-, Verifikations- und Integrationstests.

Eine solche modellbasierte Referenzarchitektur und -spezifikation dient dann zum einen als langfristiges Entwicklungsziel. Zum anderen ist sie im Sinne eines konfigurierbaren Baukastens effiziente Grundlage für Projekte (von Prototypen über Piloten bis zum Serien-Roll-out). Bei diesen Projekten kann dann auf relevante Elemente der Referenzarchitektur und -spezifikation und den Methoden für modell- und simulationsbasierte Nachweisführung und Tests aufgesetzt werden (Abb. 3).

5.2 Aktueller Stand bei der Digitalen Schiene Deutschland

Bei der Digitalen Schiene Deutschland wurde bereits 2018 mit dem Kompetenz- und Know-how-Aufbau für die grundlegenden Arbeiten begonnen. Entstanden ist neben Kosten-Nutzen-Analysen, Architektur- und Spezifikationskonzepten auch ein Entwicklungsframework (Prozesse, Methoden und Tools). Neben diesen grundlegenden Arbeiten ist ein zweiter wichtiger Schwerpunkt die schnelle Erprobung in gemeinsamen Projekten mit Industriepartnern. Vorlaufende bzw. begleitende Technologieerprobungen sowie insbesondere Prototypen und Pilotprojekte, bei denen Fahrzeuge und Infrastruktur mit entsprechenden Technologien ausgestattet werden, führt DSD in Simulationen und realer Umgebung durch.

5.2.1 Kosten-Nutzen-Analysen

Für die in der Vision enthaltenen Ziele wurden Kosten- und Nutzenanalysen zu unterschiedlichen Schwerpunkten durchgeführt, die insgesamt dazu dienen, die Planung und Steuerung des Modernisierungsvorhabens zu ermöglichen. Einzelne Studien haben zum Beispiel die Effekte auf Leistungsfähigkeit und Qualität des Bahnsystems zum Schwerpunkt. Andere fokussieren auf die erwarteten Entwicklungskosten oder beleuchten Kosten-Nutzen-Effekte eines Roll-outs. Dabei integriert eine kontinuierliche Fortschreibung laufend den Erkenntnisgewinn. Startpunkt für die Analysen war ein Gutachten des Bundes, der dem Vorhaben gesamtwirtschaftlich deutlich höhere Kosteneffizienz bescheinigt [4].

5.2.2 Systemarchitektur des digitalen Bahnsystems

Im Systemdesign entsteht ein Referenzmodell, das alle Architektur- und Spezifikationsinhalte abdeckt. Auf dem OPERATIONAL Layer des Modells werden die Akteure oder

	Modellebene	Schritte	Modellierungsgegenstand
BEDARF ("NEED")	BETRIEBLICH-OPERATIVE EBENE	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmen der "operativen/ betrieblichen Geschäftsfähigkeiten" Durchführen von Anforderungsanalysen für die "operativen/ betrieblichen Geschäftsfähigkeiten" 	<ul style="list-style-type: none"> Operative/ betriebliche Akteure und Geschäftsfähigkeiten Detaillierte operative/ betriebliche Aktivitäten der Akteure und Interaktionen zwischen den Akteuren Informationsinhalt von Aktivitäten und Interaktionen Operative/ betriebliche Prozessketten und -szenarien
	SYSTEM EBENE	<ul style="list-style-type: none"> Durchführen von operativen/ betrieblichen Auswirkungenanalysen Durchführen von funktionalen und nicht-funktionalen Systemanforderungsanalysen Formalisieren und Konsolidieren von Systemanforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> Systemeure und Systemfähigkeiten System- und Akteursfunktionen Datenaustausch der Funktionen und Funktionsketten Informationsinhalt der Funktionen und Datenaustausche, Datenmodelle Systemablaufeszenarien Systembetriebsweisen und -zustände
LÖSUNG ("SOLUTION")	LOGISCHE SUBSYSTEM EBENE	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmen der Einflussfaktoren und Perspektiven für die Systemarchitektur Entwurf von Varianten der Architektur- und Komponentenstrukturen Auswahl des Architekturentwurfs 	Analog System Layer und zusätzlich <ul style="list-style-type: none"> Logische Funktionen Logische Komponenten Logische Datenaustausche und Schnittstellen Zuordnung von Funktionen auf Komponenten
	PHYSISCHE SUBSYSTEM EBENE	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmen der Architekturschemata Auswirkungsanalysen für vorhandene Architekturen Entwurf der physischen Referenzarchitektur, Validierung und Überprüfung 	Analog System Layer und zusätzlich <ul style="list-style-type: none"> Bestimmen der Subsysteme Zuordnung der logischen Komponenten auf Subsysteme Bestimmen der physischen Schnittstellen und des Schnittstellerverhaltens

Abb. 4: Ebenen und Inhalte des Referenzmodells in Anlehnung an die ARCADIA-Methode (Architecture Analysis & Design Integrated Approach) (vgl. [2])

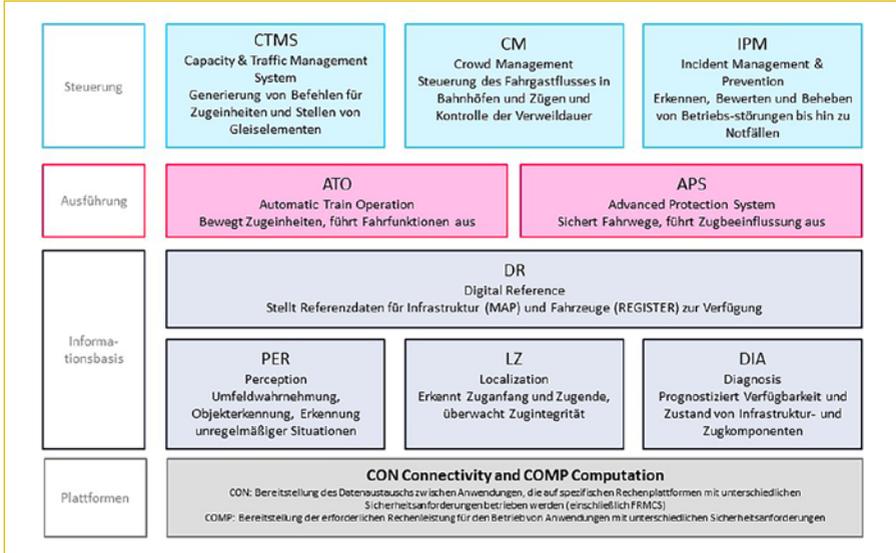


Abb. 5: Schematische Referenzarchitektur und Funktionsbereiche des digitalen Bahnsystems (LOGICAL-Layer). Die Plattformebene wird dabei klar von der Applikationsebene getrennt (PHYSICAL-Layer).

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Digitale Schiene Deutschland / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Stakeholder für die Produktion von Schienentransportleistung und ihre betrieblichen und wirtschaftlichen Anforderungen systematisch erfasst und abgebildet. Auf dem (GESAMT-)SYSTEM-Layer erfolgt die Ableitung der Systemfunktionen. Über den LOGICAL-Layer erfolgt die Zuordnung von Funktionen auf die Architekturelemente bis zum PHYSICAL (SUBSYSTEM)-Layer, der dann die vollständige Spezifikation der Subsysteme und Schnittstellen darstellt [5] (Abb. 4).

Über Product-Line-/Variantenmanagement kann das Referenzmodell so konfiguriert werden, dass Prototypenprojekte für ihre Architektur darauf aufsetzen können. Über diese Konfiguration können die Systemfähigkeiten so ausgewählt werden, dass gewünschte Anwendungsfälle der Prototypen abgebildet und unterstützt werden.

In Fortführung zum Referenzmodell entsteht ein Simulationsmodell, das zum einen die Validierung und Verifikation des Referenzmodells ermöglicht, zum anderen im Verbund mit einem Testlabor auch zur Systemintegration für die konfigurierten Modellvarianten von Prototypen genutzt werden kann.

Das Architekturkonzept folgt dabei dem Prinzip funktionaler Cluster, die einen guten Eindruck der Funktionsbereiche geben. Wie zuvor genannt, ist die Trennung der Applikationsebene von der Plattformebene ein grundlegendes Prinzip. Zur Plattformebene zählen z.B. leistungsfähige IT- und Telekommunikationsplattformen, die als Basis für alle Bahnanwendungen dienen (Abb. 5).

Je neuartiger das Feld technischer Lösungen bzw. ihrer Anwendung für eine Problemstellung ist, umso mehr sind prototypische Entwicklungen erforderlich. Da hierbei auch die klassische Rollentrennung zwischen Betreiber (weiß genau, was er braucht) und Industrie (bietet Konfigurationen bewährter Produkte) alleine nicht zielführend ist, sind auch neuartige Partnerschaftsmodelle gefragt. Hierbei können sowohl Betreiber ihre NEED-basierten Architektur-, Spezifikations- und Betriebskonzepte erproben wie auch die Industrie technische Lösungen im Rahmen der Produktentwicklung zur Reife bringen. Dieser Abschnitt soll nur einen ersten Überblick geben.

5.2.3 Prototypen für Echtzeitverkehrssteuerung

Im Rahmen der Sektorinitiative DSD hat die Deutsche Bahn AG (DB) gemeinsam mit ihrer auf anwendungsnahe KI spezialisierte Partnerfirma erste Prototypen eines auf KI basierenden Fahrplanungs- und Betriebssteuersystems der Infrastruktur entwickelt. Die größte Neuartigkeit liegt hier sicher in der Anwendung von Algorithmen der KI für die Optimierung. In einer Trainingsumgebung werden neuronale Netze mittels „Deep-Learning“ für aus der Referenzarchitektur abgeleitete Aufgabenstellungen der Verkehrssteuerung trainiert. Auf dem momentanen Stand können sog. KI-Optimierer Anfragen für mehr als 300 Zugfahrten auf Eisenbahnkorridoren mit über 3000 Gleiskilometern prozessieren und dabei innerhalb kurzer Zeit hochdetaillierte Ablaufpläne

erstellen. Der Umfang der Aufgaben und die Komplexität der Umgebung wird schrittweise erhöht [6].

Der Produktiveinsatz des Fahrplanungs- und Betriebssteuersystems ist ebenso in Schritten geplant. Aufbauend auf einer umfangreichen Simulationsumgebung, die das System trainiert, wird das Grundsystem erstmalig im Digital Knoten Stuttgart (DKS) zum Einsatz kommen.

5.2.4 Prototypen für zugzentrisches Sicherungsverfahren mit generischer Algorithmik

Die Ambition, das Bahnsystem sicherungstechnisch von fester Abschnittslogik auf Abstandslogik („Zugzentrik“) umzustellen und dabei gleichzeitig durch generische Sicherheitsalgorithmik und digitale Infrastrukturlayouts unabhängig von individueller Projektierung zu werden und den Betrieb prozessual zu vereinfachen, braucht zunächst ebenfalls ein prototypisches Umfeld. Gegenüber der gewachsenen heutigen Architektur mit ihren Funktionsverteilungen und Schnittstellen sind größere Änderungen erforderlich. Auch hier sollen in einem geeigneten Bahnumfeld schrittweise aus der Referenzarchitektur abgeleitete Aufgabenstellungen zusammen mit Industriepartnern prototypisch implementiert werden.

Die Ausgangsbasis für die Prototypisierung bildet ein Simulationsmodell, über das bereits zu diesem Zeitpunkt schon Vorteile des zugzentrischen Sicherungsverfahrens verifiziert werden konnten. Dieses verarbeitet achszähler- und fahrzeugseitige Positionsmeldungen und gibt Zugfahrten auf Basis einer generischen Sicherheitslogik frei.

Die erste reale prototypische Umsetzung wird im Rahmen der europäischen Initiative ERJU (Europe’s Rail Joint Undertaking) im Projektbündnis aus Herstellern und Infrastrukturbetreibern auf einer Teststrecke geschehen. Diese stellt dann die Grundlage für die Folgeumsetzung in einem Zulassungsprojekt dar, welches sowohl die Zulassungsfähigkeit des Systems als auch die Vorteile im produktiven Betrieb bescheinigen soll.

5.2.5 Prototypen für hoch- und vollautomatisiertes Fahren



In diesem großen Innovationsfeld hat die DSD inzwischen zwei erfolgreiche Pilotprojekte durchgeführt, die im Rahmen des ITS Weltkongresses in Hamburg im Herbst 2021 der Öffentlichkeit gezeigt wurden: Das erste Projekt, die „Digitale S-Bahn Hamburg (DSH)“, begann bereits 2018 und war ein Kooperationsprojekt der Hansestadt Hamburg, Siemens Mobility und der DB. Auf einer 23 km langen, mit ETCS



ausgerüsteten Strecke fuhren vier umgebaute Züge des Projektes DSH auf der Linie S21 mehrmals täglich hochautomatisiert im Fahrgastbetrieb im Automatisierungsgrad GoA 2. Auf dem entsprechend ausgebauten Abschnitt übernahm der Tf nur noch die Streckenbeobachtung und griff lediglich bei Störungen ein. Der hochautomatisierte Bahnbetrieb bringt zahlreiche Vorteile: Die Taktung auf derselben Strecke kann deutlich verkürzt werden, die Energieeffizienz steigt, und der Betrieb wird insgesamt zuverlässiger und stabiler. Mit dem Projekt wurde das Ziel verfolgt, Automatic Train Operation (ATO) unter Nutzung von ETCS nicht

nur technisch und betrieblich umzusetzen, sondern auch zeitnah für den regulären Fahrgastbetrieb zur Zulassung zu bringen. In 2022 werden die ersten vier Züge im regulären Fahrgastbetrieb eingesetzt. Dadurch wurde ein wichtiger Meilenstein für die Einführung von ATO im deutschen Schienennetz erreicht [7]. Zukünftig werden weitere Bestandsfahrzeuge sowie 64 Neufahrzeuge mit ATO ausgerüstet.

Im DKS wird auf die Meilensteine der Projektes DSH aufgesetzt. Erstmals wird ein ganzer Bahnknoten in Deutschland mit ETCS und ATO GoA 2 ausgerüstet. Die Vergabeverfahren für bis zu 230 neue Regionaltriebzüge sowie zur Nachrüstung von 215 S-Bahn- und 118 Nahverkehrs-Triebzügen wurden 2022 abgeschlossen, die Fahrzeuge befinden sich bereits seit April 2022 im Umbau [8].

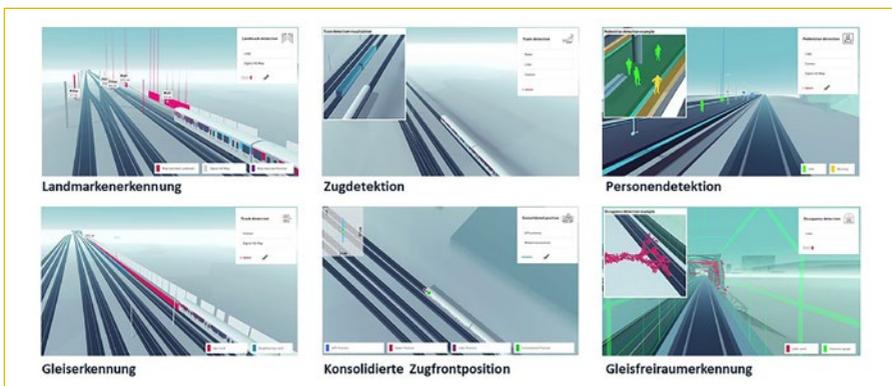


Abb. 6: Übersicht der im Projekt Sensor4Rail erprobten Funktionalitäten, die im Rahmen einer Live-Animation im Zug und zeitgleich auf dem DB-Messestand während des ITS Weltkongresses gezeigt wurden.

Die Ambition ist gewaltig, das Bahnsystem so weiterzuentwickeln, dass vollautomatisiertes, d.h. fahrerloses (ATO GoA 3) oder sogar unbegleitetes Fahren (ATO GoA 4) Realität wird. Genau an diesem Punkt setzte dann das im Frühjahr 2019 gestartete Projekt Sensors4Rail an [9]. Denn der vollautomatisierte Bahnbetrieb der Zukunft im Automatisierungsgrad GoA 4 benötigt weitere Systeme. Dazu gehören u.a. eine sensorbasierte Umfeldwahrnehmung, eine präzise Echtzeitlokalisierung sowie eine hochgenaue, digitale Karte des Gleisumfeldes. Dafür wurden hochmoderne Sensoren und eine leistungsfähige Rechnerumgebung in ein weiteres Erprobungsfahrzeug der S-Bahn Hamburg integriert und entsprechende Softwarekomponenten entwickelt. Das System stellt genaueste Informationen über das Umfeld des Zuges und eine präzise Zugposition in Echtzeit zur Verfügung. Durch eine intelligente Kombination dieser Technologien ist die Erkennung von statischen und dynamischen Hindernissen auf und neben dem Gleis sowie deren Gefahreinschätzung möglich (Abb. 6).

Darüber hinaus werden wichtige betriebliche Daten in hoher Frequenz (z.B. Positionsdaten oder Hindernisse im Gleis) gesammelt und über eine Cloudschnittstelle bereitgestellt. Diese Daten können dazu benutzt werden, z.B. Störungen schneller zu bearbeiten und die Zugdisposition zu optimieren, um den Bahnverkehr flüssiger und zuverlässiger zu machen. Diese Technologien, die bislang eher in anderen Industriebereichen Entwicklung und Anwendung finden, stehen im Bahnsektor aufgrund seiner zahlreichen Besonderheiten noch am Anfang der Entwicklung und müssen technisch und betrieblich von Grund auf neu eingeführt werden. Sensors4Rail startete als gemeinschaftliche Forschungs- und Innovationskooperation zwischen der Sektorinitiative DSD und Kooperationspartnern aus der Bahnbranche (DB, Siemens Mobility) und Automobilbranche (Bosch Engineering, HERE Technologies, Ibeo Automotive Systems GmbH). Durch eine Ausweitung des Testgebietes auf weitere Strecken im Hamburger S-Bahn-Netz werden 2022/2023 wertvolle Erkenntnisse über die Performance der Funktionen in unterschiedlichen Szenarien und Streckenabschnitten gewonnen werden. Außerdem steht eine Erhöhung der Diversität der Daten im Vordergrund. Eine der weiteren Herausforderungen ist es, dies alles noch rückwirkungsfrei bzw. ohne Eingriffsmöglichkeiten in die Fahrzeugsteuerung zu gestalten. Für einen nächsten Schritt im Innovationsfeld des vollautomatisierten Fahrens sind auch Prototypen mit Eingriffen in die Fahrzeugsteuerung geplant.

5.2.6 Prototypen für Kommunikation: FRMCS-Testfeld

Als wesentliche Grundlage für das digitalisierte Bahnsystem arbeitet der europäische Bahnsektor an der Einführung des 5G-basierten Bahnfunks Future Railway Mobile Communication System (FRMCS), für welches in 2024 eine erste vollständige Spezifikation vorliegen und das perspektivisch ab 2028 ausgerollt werden soll. Bereits sehr frühzeitig wurde daher die Standardisierung des zukünftigen 5G-basierten Bahnfunks FRMCS durch

DSD begleitet, damit das angepeilte FRMCS-System auch die längerfristigen Anforderungen des digitalisierten Bahnsystems abdeckt und maximal auf sektorübergreifenden Lösungen basiert [10]. Um frühzeitig Erfahrung mit FRMCS aufzubauen und die Grundlagen für einen kosteneffizienten späteren Roll-out zu legen, hat die DSD im Digitalen Testfeld Bahn im Erzgebirge ein 10 km langes FRMCS-Testfeld aufgebaut. In einer vergangenen F&E-Kollaboration mit Ericsson und Rohde & Schwarz lag hierbei ein Fokus auf

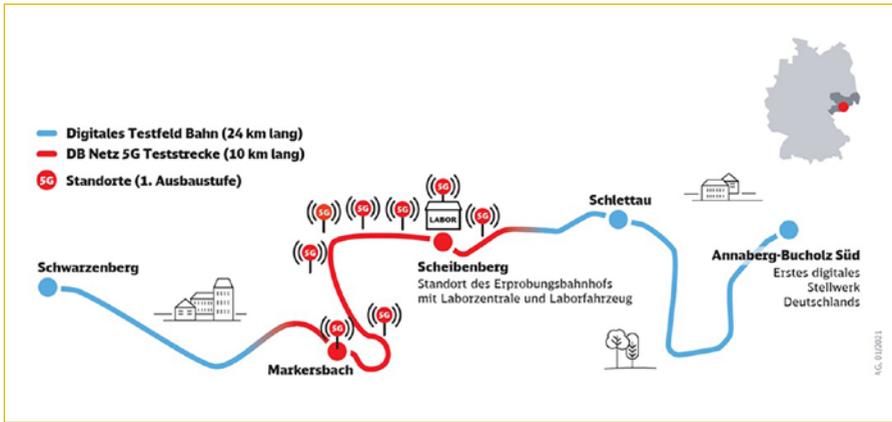


Abb. 7: FRMCS/5G-Teststrecke im Digitalen Testfeld Bahn im Erzgebirge

der erstmaligen Nutzung der neuen Bahnfunkfrequenz 1,9 GHz sowie auf der Nutzung innovativer Antennensysteme zur optimalen Ausleuchtung von Trassen und Reduktion der Implementierungskosten [11]. In einem laufenden Projekt mit Kontron und Nokia wurde ein ganzheitliches FRMCS-System (bestehend aus 5G-Radio- und Kernnetz-Technologie sowie dem sogenannten „Mission Critical Framework“) aufgebaut, mit dem Ziel, insbesondere das Zusammenspiel der genannten Ebenen des Kommunikationssystems zu erproben und zu optimieren [12]. Das FRMCS-Testfeld spielt zudem eine wesentliche Rolle im EU-geförderten Projekt 5G Rail [13], welches eine standardisierungsbegleitende Validierung des FRMCS-Systems vornimmt. Perspektivisch soll die FRMCS-Installation im Erzgebirge genutzt werden, um bahnbetriebliche Anwendungen darüber zu erproben, wie z.B. die zuvor genannten neuen Ansätze der Fahrweg- und Zugsicherung (Abb. 7).

5.2.7 Prototypen für Computation

Entsprechend der in Abschnitt 4.5 genannten Paradigmen treibt die DSD eine standardisierte Trennung von bahnbetrieblichen Applikationen und den darunter liegenden IT-Plattformen voran. So leitet die DSD seit 2020 eine gemeinsame Arbeitsgruppe zwischen den Bahninitiativen Reference CCS Architecture (RCA) und

Open CCS Onboard Reference Architecture (OCORA), die sich mit dem Konzept einer sogenannten „Safe Computing Platform“ befasst, welche die zuvor genannte Trennung insbesondere für sicherheitsrelevante Applikationen ermöglicht [14]. In einer F&E-Kollaboration zwischen der DB und Siemens Mobility wurde das Konzept am Beispiel von infrastruktureseitigen Datenzentren weiter technisch detailliert und auch wirtschaftlich betrachtet [15]. Basierend auf den zuvor genannten Arbeiten, hat die DSD Anfang 2022 zusammen mit Bahnbetreibern (DB, SBB, SNCF, NS) und Industriepartnern (Siemens Mobility, Real-Time Innovations (RTI), SYSGO GmbH, Thales, duagon AG, Wind River) einen ersten Entwurf für eine mögliche standardisierte Schnittstelle zwischen bahnbetrieblichen Applikationen und IT-Plattform veröffentlicht [16, 17]. Diese Spezifikation stellt nun eine gute Basis für die Entwicklung von Prototypen dar. So ist z. B. im Programm Europe's Rail geplant, eine Referenz für eine Onboard-Plattform-Implementierung zu erstellen, die aufzeigt, wie zugehörige bahnbetriebliche Applikationen auf einer Safe Computing Platform umgesetzt werden und wie diese mit anderen Innovationen, z. B. standardisierten Diagnoseinterfaces und dem Onboard FRMCS System, zusammenspielt.

5.3 Migrations- und Implementierungsüberlegungen

Die Integration neuer Fähigkeiten und dafür erforderlicher Verfahren, Prozesse und Technologien in das Bahnsystem lässt sich nur über einen längeren Zeitraum betrachten und ist komplex. Leitgedanke muss dabei sein, die Kompatibilität zwischen Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung möglichst zu erhalten, aber gleichzeitig das Nebeneinander von Alt- und Neutechnik zu minimieren, um frühzeitig von den Modernisierungseffekten profitieren zu können.

Für den bereits begonnenen Roll-out von DSD mit ETCS L2 / DSTW wurde eine gegenüber der Infrastruktur vorlaufende DSD-Fahrzeugausrüstung (ETCS L2 zusätzlich zu Class B) gewählt, um Kompatibilität zu bisheriger und modernisierter Infrastruktur zu gewährleisten. Dieses Prinzip sollte immer auch für die weitergehende Ertüchtigung des Bahnsystems hin zu einem digitalen Bahnsystem gewählt werden. Auch die Fahrzeugausrüstung mit, neben ETCS, insb. ATO für GoA 2, Zugintegrität bei Triebzügen und Vorrüstung für FRMCS ist bereits in der ersten Welle vorgesehen.

5.3.1 Territorialprinzip (Areas of Control – AoC)

Grundsätzlich sollte in Territorien („Areas of Control = AoC“) gedacht werden, für die eine Modernisierung vorgesehen ist. Für eine solche AoC braucht es neben Techniklösungen auch betriebliche Verfahren und Netzzugangsregeln für Fahrzeuge. Die Zugangs-

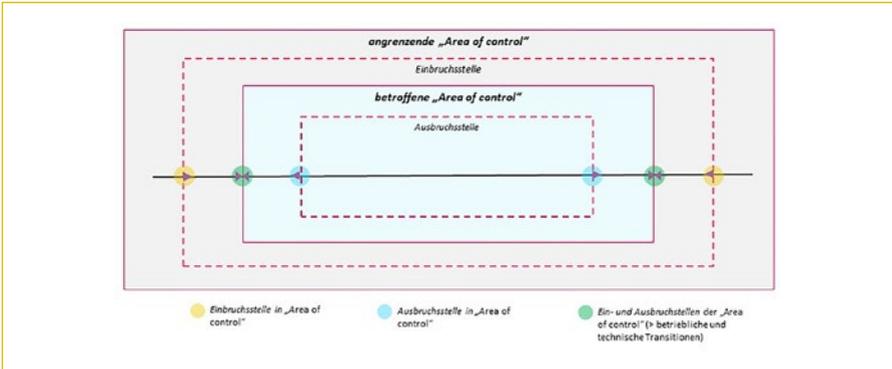


Abb. 8: Schematische Darstellung der Ein- und Ausbruchsstellen an den „Areas of Control (AoC)

regeln beinhalten die minimal erforderliche Ausrüstung zum Befahren der AoC und definieren die Minimalkompatibilität. Ein solcher Ausrüstungsgrad kann aber ggf. die Leistungsfähigkeit der AoC nicht voll ausschöpfen. Die Definition höherwertiger Ausrüstungsgrade (Maximalkompatibilität) ermöglicht dann die volle Leistungsfähigkeit der AoC. Als Beispiele für solche AoC könnten aktuell die drei Projekte des im Jahre 2020 gestarteten „DSD Starterpaket“ sowie die Planung eines netzbezirksweisen Flächen-Roll-outs gesehen werden [1].

An den verkehrlichen Ein- und Ausbruchstellen der AoC werden betriebliche und technische Transitionen für Fahrzeuge erforderlich. Um diese Transitionen effizient zu ermöglichen, kommt der Verkehrssteuerung große Bedeutung zu. Sie muss in der Lage sein, ein- und ausgehende Bewegungen mit den Nachbarbereichen abzuwickeln. Die führenden, infrastrukturseitigen Systeme der AoC und ihrer Nachbarbereiche benötigen entsprechende Schnittstellen, um Transitionen zu unterstützen (Abb. 8).

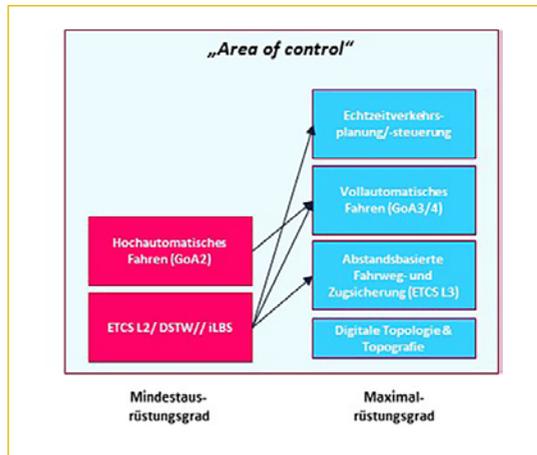


Abb. 9: Der ETCS/ DSTW-Roll-out in Verbindung mit ATO GoA 2 bildet einen sinnvollen Mindestausrüstungsgrad auf dem Weg zum digitalen Bahnsystem.

Eine Modernisierung ganzer Netze oder Teilnetze von mehr oder weniger geschlossenen Bahnsystemen, wie z. B. S-Bahnnetze oder Regionalbahnnetze, erscheint weniger komplex, da eine solche AoC und der relevante Fahrzeugbestand klar abgrenzbar sind und in der Regel keine verkehrlichen Ein-/Ausbruchstellen mit Transitionen zu Nachbarbereichen bestehen. Es kann aber auch sinnvoll sein, gezielt Engpässe eines Gesamtnetzes (z. B. Strecken bzw. Streckenabschnitte) als AoC in den Fokus einer Modernisierung zu nehmen, deren Komplexität durch die größere Fahrzeugvielfalt und das Annäherungs- und Transitionsmanagement an den verkehrlichen Ein-/Ausbruchstellen bestimmt ist. Infrastrukturseitig sind eine digitale Karte der Topologie und Topografie (für die AoC und Nachbarbereiche) und ein Register mit relevanten Fahrzeugdaten wesentliche Enabler für die Modernisierung. Sie werden in Verbindung mit einem Kommunikationssystem mit niedriger Latenz und hoher Bandbreite Grundlage für die Kernfähigkeiten automatisiertes Fahren, neue Fahrweg- und Zugsicherung wie auch die Echtzeitverkehrssteuerung (Abb. 9).

5.3.2 AoC mit Echtzeitverkehrssteuerung und Crowd Management

AoC können im Prinzip unabhängig von ATO und ETCS für Echtzeitverkehrssteuerung und Crowd Management ausgerüstet werden. Die Annahme ist aber, dass mindestens eine Ertüchtigung auf ATO GoA 2 und ETCS L2/DSTW erfolgt und sich „moderner steuernder Durchgriff“ sowohl auf Fahrzeuge wie auch die Infrastruktur realisieren lässt.

● **Infrastrukturausrüstung**

Die Ausrüstung besteht aus dem Verkehrssteuerungssystem selbst, das auch die vorhandene abschnittsbezogene oder zugzentrische Sicherungslogik beinhalten muss, ohne selbst Sicherungssystem zu sein. Die Steuerungsimpulse für die Infrastrukturseite müssen in Form einer Schnittstelle an das abschnittsbezogene oder zugzentrische Sicherungssystem übergeben werden. Bestehende Diagnosesysteme müssen angebunden oder fehlende Diagnosesysteme ergänzt werden. Außerdem müssen betroffene EVU mit ihren Systemen für Planung und Disposition angebunden werden können. Die Steuerungsimpulse für die Fahrzeugseite werden an die infrastrukturseitigen ATO-Systeme übergeben. Für das Störungs- und Notfallmanagement müssen vorhandene Systeme eingebunden oder neue Systeme installiert werden. Ein ergänzendes Crowd-Management-System erfordert zusätzlich die Ausrüstung der Bahnsteige und Stationen mit Sensorik und Aktorik. Statt reiner Topologiedaten werden Topografiedaten erforderlich.

● **Fahrzeugausrüstung**

Fahrzeugeitig sind Diagnosesysteme erforderlich, die Zustandsinformationen für relevante Fahrzeugeigenschaften erfassen und an die infrastrukturseitigen Systeme

übergeben. Um volle Wirksamkeit zu erzielen, müssen die Fahrzeuge für den Personenverkehr auch mit Systemen ausgerüstet sein, die den Besetzungsgrad erfassen.

5.3.3 AoC mit zugzentrischem Sicherungsverfahren und generischer Algorithmik

Die Modernisierung einer AoC, d.h. die Umstellung von abschnittsbasierter auf zugzentrische Sicherung, stellt einen fundamentalen Wechsel dar. Damit er gelingen kann, muss das neue System auch in der Lage sein, bisherige Informationen verarbeiten zu können. Bei einem solchen Wechsel wird die Leistungsfähigkeit einer AoC im Wesentlichen dadurch bestimmt, in welchem Umfang die verkehrenden Fahrzeugflotten sichere Zugintegritäts- und Lokalisierungsinformationen als Teil des ETCS liefern können [1].

● **Infrastrukturausrüstung**

In einer zu modernisierenden AoC werden die heutigen Funktionen von Stellwerk und RBC in dem zugzentrischen Sicherungssystem mit generischem Algorithmus zusammengefasst. Teil der Ausrüstung wird auch das digitale Abbild der Topologie, welches jederzeit sicher vorliegen muss. Aktualisierungen des Infrastrukturlayouts können dann jederzeit durch den Sicherungsalgorithmus ohne zusätzliche Projektierung verarbeitet werden. Besondere Bedeutung hat die Anbindung der Systeme einer modernisierten AoC mit den Systemen der Nachbar-AoC, da dies die wesentliche Voraussetzung für das Transitionsmanagement darstellt.

Sofern in der zu modernisierenden AoC auch Fahrzeuge ohne Integritätsüberwachung in ETCS verkehren sollen, müssen Gleisfreimeldeanlagen im für die Leistungsfähigkeit erforderlichen Umfang angebunden sein. Mit zunehmendem Ausrüstungsgrad der Fahrzeuge mit Zugintegritätsüberwachung kann der Rückbau von Gleisfreimeldeanlagen erfolgen. Die Infrastrukturfeldelemente, neben den Gleisfreimeldeanlagen die Weichen, werden durch EULYNX Object Controller angebunden.

Für Lokalisierungszwecke sind infrastrukturseitig ETCS-Balisen vorzuhalten. Der Umfang der ETCS-Balisenrüstung wird dabei auch davon beeinflusst, ob fahrzeugseitig weitere sichere Lokalisierungstechniken vorhanden sind [18].

● **Fahrzeugausrüstung**

Die entscheidende Grundvoraussetzung für ein zugzentrisches Sicherungssystem ist die Ausrüstung der Fahrzeuge mit ETCS. Zugintegritätsmeldungen auf Basis von ETCS ermöglichen Verzicht bzw. Reduktion von Gleisfreimeldeanlagen und die Erhöhung der Streckenkapazität. Die Zugintegritätslösung kann für den Schienenpersonenfern- und -nahverkehr (SPNV/SPFV) bei Triebzügen mit entsprechender Technik realisiert werden und ist Teil der DSD-Fahrzeugausrüstung. Insbesondere für den Schienengüterverkehr (SGV) ist hier die Ausrüstung mit der Digitalen Automatischen Kupplung – DAK – ein wesentlicher Enabler.

Als fahrzeugseitiges Ortungssystem kann die bestehende Balisenortung mit Odometrie verwendet werden. Allerdings führt eine genauere Ortung, die mit einer Erweiterung der Fahrzeugausrüstung einhergeht, zu einer präziseren Zugfahrtsicherung und ermöglicht damit kürzere Zugfolgezeiten. Der Vorteil liegt also auf der Hand, die bestehenden Ortungssysteme zu erweitern.

5.3.4 AoC mit vollautomatisiertem Fahren

Fahrzeugseitig sind deutliche Erweiterungen der Ausrüstungen für vollautomatisiertes (fahrerloses) Fahren in GoA 4 over ETCS zu erwarten. Die Intention, in einer AoC einen höheren Ausrüstungsgrad als GoA 2 over ETCS (als Mindestausrüstungsgrad) zu realisieren, erfordert aber ein entsprechendes integriertes Störungs- und Notfallmanagement, das von den EIU und EVU in einem gemeinschaftlichen Ansatz umgesetzt werden muss. Unter anderem dafür wird auch FRMCS als Funksystem erforderlich.

- **Infrastrukturausrüstung**

Die AoC muss infrastrukturseitig zusätzlich zu ETCS/DSTW und ATO für GoA 2 die erforderlichen Komponenten erhalten, die den angestrebten maximalen Automatisie-



Start **DRIM**ing.

Digital Railway Infrastructure and Information Management.



Etablierte Ingenieurkompetenz trifft auf digitale Transformation.

OBERMEYER Infrastruktur GmbH & Co. KG
schiene@obermeyer-group.com | www.obermeyer-group.com

rungsgrad ermöglichen. Dafür sind nicht mehr nur digitale Topologiedaten, sondern auch digitale Topografiedaten erforderlich, die von infrastrukturseitigen Systemen bereitgestellt werden müssen. Und auch die infrastrukturseitigen Systeme für das integrierte Störungs- und Notfallmanagement sind dafür zu ertüchtigen. Zur Kommunikation mit den Fahrzeugen wird die Infrastruktur mit FRMCS ausgerüstet. Das bereits für ATO GoA 2 vorgehaltene System mit Schnittstellen zu den Planungs- und Dispositionssystemen für Fahrzeuge und Infrastruktur, von dem die jeweiligen Fahrzeuge entsprechende Steuerungsdaten erhalten, ist für GoA 4-Betrieb zu ertüchtigen.

● **Fahrzeugausrüstung**

In Vorbereitung des hochautomatisierten Fahrens sieht die DSD-Fahrzeugausrüstung neben ETCS bereits ATO GoA 2 (inkl. FRMCS-Vorrüstung) vor. Für GoA 3/4 über ETCS werden dann weitere Onboard-Systeme erforderlich, die die wahrnehmungsbezogenen und zum Teil sicherheitsrelevanten Aufgaben beim Führen eines Zuges übernehmen. Auch fahrzeugseitige Komponenten für das integrierte Störungs- und Notfallmanagement gehören dazu. Dafür sind möglichst frühzeitig bereits Reserven für Masse, Energie und Einbauraum bei Neubestellungen zu berücksichtigen.

6 Europäischer Kontext

Für Weiterentwicklungen des Bahnsystems ist ein europäisches Vorgehen essenziell und unumgänglich. Bei 27 Mitgliedsstaaten, die alle von einem spezifischen, national gewachsenen Bahnsystem kommen, ist ein gemeinsamer Ansatz sehr herausfordernd. Eine Chance liegt darin, nicht zu früh allein über technische Harmonisierung zu diskutieren, sondern im ersten Schritt systematisch eine Harmonisierung auf funktionaler und nicht-funktionaler betrieblicher Ebene zu erreichen und damit den Grundstein für harmonisierte technische Entwicklungen zu legen.

Im kurz vor Abschluss stehenden Shift2Rail-Programm wurde stark an technischen Demonstratoren gearbeitet. Dabei sind viele Erkenntnisse gewonnen worden. Eine wesentliche Erkenntnis ist auch, dass ohne eine führende und ordnende Gesamtarchitektur die Arbeit schnell zerfasert.

Dies ist einer der Gründe, warum das 2022 beginnende Nachfolgeprogramm Europe's Rail neben einer Innovationssäule eine Systemsäule erhielt. Nun wird es darauf ankommen, dass alle nationalen Initiativen zur Digitalisierung und Weiterentwicklung des Bahnsystems ihre Erkenntnisse im Rahmen der Systemsäule einbringen und dort ein gemeinsamer und harmonisierter Ansatz entsteht, der sich in den technikorientierten Demonstratoren der Innovationssäule fortsetzt.

Um eine europaweite Migration zu ermöglichen, müssen die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) in dem Maße erweitert werden, wie es für eine „Single European Railway Area“ erforderlich ist. Doch auch abseits vom Interoperabilitätswang

gibt es gute Gründe, den Anspruch auf Harmonisierung auszuweiten. Länderspezifische Produktvarianten sind nicht nur nachteilig im Hinblick auf Entwicklungs- und Zulassungsaufwand und damit für die wirtschaftliche Tragfähigkeit des europäischen Bahnsystems. Langfristig stellen sie auch ein Risiko für die globale Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Bahnindustrie dar. Oder anders gesagt: Hier liegen große Chancen allem voran für die Bahnbetreiber und die Bahnindustrie, aber auch für alle anderen Akteure im Sektor.

Quellen

- [1] Bührschr, P.; Büker, T.; Schotten, S.; Hardel, S.: Vorteile und Nutzen von ETCS L2oS und DSTW im Schienenverkehr, EIK 2022, S. 223–238
- [2] Schmidt, S.; Grabowski, D.: Das „ETCS-Stellwerk“, SIGNAL+DRAHT 10/2018, S. 32–36
- [3] RCA Published Releases, BLOR4, insb. “RCA.Doc.50: A.P.M business targets and strategy” und “RCA.Doc.51: Concept: APS”; <https://public.3.basecamp.com/p/KeehZqFmXv5R2N7tGDJaEokq>
- [4] Machbarkeitsstudie zum Roll-out von ETCS/DSTW, McKinsey&Company im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Dezember 2018
- [5] Technologies de l’information – ARCADIA – Méthode pour l’ingénierie des systèmes soutenue par son langage de modélisation conceptuel — Normalisation française P. 67-140 und <https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html>
- [6] Künstliche Intelligenz als Game Changer für das Kapazitäts- und Verkehrsmanagement im Bahnsystem der Zukunft; online unter: <https://digitale-schiene-deutschland.de/aktuelles/KI-als-Game-Changer>
- [7] Schröder, J.; Goncalves, C.; Dickgiesser, B.; Talg, M.: Digitale S-Bahn Hamburg, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 10/2021, S. 44–47
- [8] Jost, M.; Erdmann, J.; Dietrich, F.; Raichle, F.; Sane, N.; Vogel, T.; Wagner, P.: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, ZEV Rail 05/2022
- [9] Hauswald, C.; Kriegenberg, D.; Fiack, A.: Digitale Schiene Deutschland testet im Projekt Sensor4Rail erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb, Deine Bahn 4/2022, S. 36–43
- [10] Marsch, P.; Fritzsche, R.; Holfeld, B.; Kuo, F.-C.: 5G für das digitalisierte Bahnsystem der Zukunft – ein Ausblick auf FRMCS, SIGNAL+DRAHT 03/2022, S. 11–17
- [11] Holfeld, B.; Lossow, M.; Tyrskyy, M.; Mehira, S.; Garcia, L.; Biemond, S.; Bach, C.: „Field Study on Multi-Antenna Radio Technologies for Future Railway Communications at 1.9 GHz“, IEEE Vehicular Technology Conference, Helsinki, June 2022
- [12] FRMCS-Erprobungsprojekt realisiert erste Ende-zu-Ende Übertragung mit 5G im Digitalen Testfeld Bahn im Erzgebirge; online unter: <https://digitale-schiene-deutschland.de/aktuelles/FRMCS-E2E-Announcement>
- [13] online unter: <https://5grail.eu/about-the-project/>
- [14] RCA/OCORA, “An Approach for a Generic Safe Computing Platform for Railway Applications”, White Paper, Version 1.1, Juni 2021; online unter https://github.com/OCORA-Public/Publication/blob/master/05_OCORA_R1/OCORA-TWS03-010_Computing-Platform-Whitepaper.pdf
- [15] Steffens, S.; Suess, T.; Eschmann, F.; Marsch, P.: SIL4 Data Center – eine neue Plattform-Architektur für sichere Bahnanwendungen, SIGNAL+DRAHT 10/2021, S. 41-48; online unter https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/Signal%26Draht_113_10_21_SIL4DataCenter.pdf
- [16] Digitale Schiene Deutschland spezifiziert zusammen mit Bahnbetreibern und Industrie eine Safe Computing Plattform für den Bahnbetrieb der Zukunft; online unter <https://digitale-schiene-deutschland.de/aktuelles/Spezifikation-Safe-Computing-Plattform>
- [17] RCA/OCORA and industry partners, “Generic Safe Computing Platform – Specification of the PI API between Application and Platform”, Version 2.0, Juli 2022; online unter https://github.com/OCORA-Public/Publication/blob/master/06_OCORA%20R2/OCORA-TWS03-030_SCP_Specification_of_the_PI_API_between_Application_and_Platform.pdf
- [18] <https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/Clug%20Brochure.pdf> und <https://digitale-schiene-deutschland.de/aktuelles/CLUG-Lokalisierung-von-Zuegen-GNSS>



Dipl.-Ing. Ingo Biembacher
Leiter Systemspezifikation und -integration
Digitale Schiene Deutschland
ingo.biembacher@deutschebahn.com



Dr. Annika Hundertmark
Leiterin Digitalisierung Bahnsystem
Digitale Schiene Deutschland
annika.hundertmark@deutschebahn.com



Dr. Patrick Marsch
Leiter Plattformentwicklung
Digitale Schiene Deutschland
patrick.marsch@deutschebahn.com



Dipl. Phys. Achim Fiack
Steuerung u. Projektmanagement
Digitale Schiene Deutschland
achim.fiack@deutschebahn.com



Dr. Andy Grell
Leiter Entwicklung Steuersysteme
Digitale Schiene Deutschland
andy.grell@deutschebahn.com



Dr. Dirk Spiegel
Leiter Entwicklung Systeme vollautomatisches Fahren
Digitale Schiene Deutschland
dirk.spiegel@deutschebahn.com



Dr. Moritz Heimes
Leiter Projects & Partners
Digitale Schiene Deutschland
moritz.heimes@deutschebahn.com



Dipl.-Math. Thomas Laux
Leiter Steuerung und Projektmanagement
Digitale Schiene Deutschland
thomas.laux@deutschebahn.com

alle Autoren:
DB Netz AG, Berlin